

УДК 681.513+629.78

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ АДАПТАЦИИ КОМПЛЕКСНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2015 И. В. Фоминов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург

Рассматривается концепция построения адаптивного бортового информационно-измерительного комплекса малого космического аппарата. Разработанная концепция многоуровневой адаптации комплексных навигационных систем малых космических аппаратов позволяет обеспечить требуемые показатели точности и живучести в условиях воздействующих факторов и возникновения нештатных ситуаций. Отличительной особенностью предложенной концепции является отсутствие ярко выраженного информационно-измерительного ядра, присущего существующим комплексным навигационным системам различных подвижных объектов. Формирование базовой информации навигационной системы, относительно которой предполагается коррекция других систем, осуществляется в соответствии со сложившейся ситуацией, определяемой уровнем возмущающих воздействий, возникающих отказов, а также режимами функционирования малого космического аппарата. Концепция предполагает три уровня адаптации: параметрический, информационный и структурный. На параметрическом уровне осуществляется автоматическая настройка параметров датчиков измерительных систем, обеспечивающих оптимальный с точки зрения точности режим функционирования. Информационный уровень адаптации обеспечивает требуемую точность определения параметров ориентации и навигации посредством реализации адаптивного метода комплексной обработки навигационной информации. Структурный уровень обеспечивает самоорганизацию системы, заключающуюся в создании управления режимами работы измерительной аппаратуры и управления информационными ресурсами, сохраняющими целостность навигационной информации в условиях возникновения нештатной ситуации. При разработке концепции многоуровневой адаптации адаптивного бортового информационно-измерительного комплекса малого космического аппарата использовались методы системного анализа.

Навигационная система, адаптация, идентификация, адаптивный бортовой информационно-измерительный комплекс, интеллектуальный датчик, малый космический аппарат.

doi: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-83-91

Введение

Современные тенденции развития малых космических аппаратов (МКА) различного назначения направлены на обеспечение эффективности выполнения ими целевых задач при ужесточении требований к массово-габаритным характеристикам бортового комплекса управления, характеристикам ресурсоёмкости и энергопотребления, уровню автономности, надёжности и продолжительности функционирования. Несмотря на существенные достижения в области космического приборостроения, удовлетворение таких противоречивых требований, предъявляемых к характеристикам МКА и его бортового комплекса управления, остаётся сложной научно-технической проблемой.

При этом эксплуатация навигационных систем (НС) МКА происходит в условиях влияния возмущающих факторов и возникновения нештатных ситуаций.

Под нештатной ситуацией понимается сочетание условий или возникновения событий при эксплуатации навигационной системы или комплекса, отличающихся от заданных и способных привести к возникновению отказа системы, её составной части или элементов.

Наиболее существенными для НС МКА внешними возмущающими факторами космического пространства являются [1]:

- тепловое излучение;
- солнечное излучение;
- магнитные возмущения;

- ионизирующее излучение;
- вибрации корпуса аппарата;
- микрометеорные воздействия.

К внутренним возмущающим воздействиям относятся:

- инструментальные погрешности датчиков НС МКА и нестабильность их параметров;
- несовершенство используемого программно-алгоритмического обеспечения НС МКА;
- отказы элементов бортового обеспечивающего комплекса МКА.

Внешние возмущающие воздействия являются одной из основных причин деградации измерительной аппаратуры, приводящими к их отказам, и, как правило, имеют случайный нестационарный характер [2].

В настоящее время парирование их влияния осуществляется следующими способами:

- созданием схем резервирования, мажоритарными схемами построения навигационных систем;
- применением специальных средств обеспечения условий функционирования навигационных систем (систем терморегулирования, экранирования и т.д.);
- использованием систем контроля и диагностирования бортового оборудования КА.

В условиях ужесточения требований к массово-габаритным характеристикам МКА, характеристикам энергопотребления и производительности бортовых вычислителей такие меры могут быть не всегда реализованы. Перспективным направлением дальнейшего развития космических средств в настоящее время является создание МКА с длительным сроком активного существования (более 10 лет), что требует разработки новых принципов построения и эксплуатации НС, обеспечивающих требуемые показатели качества функционирования в условиях деградации технических характеристик измерительных приборов.

Решение проблемы обеспечения требуемых показателей точности и живу-

чести систем навигации возможно благодаря разработке и применению:

- автономных методов контроля и диагностики элементов НС МКА;
- адаптивных методов обработки навигационной информации от различных измерительных приборов;
- методов синтеза адаптивных НС МКА, которые функционируют в условиях действия возмущающих факторов и возникновения нештатных ситуаций.

Решение этой проблемы возможно посредством расширения спектра существующих задач современных НС МКА и объединения их в единый комплекс. В соответствии с современной классификацией [3] совокупность гетерогенных НС МКА, объединённых единым функционалом, относится к классу информационно-измерительных комплексов.

В области создания теории построения и применения адаптивных и интеллектуальных навигационных комплексов различных подвижных объектов известны работы [4-11]. Результаты этих исследований предполагают наличие в навигационных комплексах единого информационно-измерительного ядра. Как правило, таким ядром является инерциальная навигационная система, постоянно функционирующая и периодически корректируемая другими измерительными средствами.

Развитие приёмной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем и звёздных датчиков в направлении совершенствования их эксплуатационных характеристик позволило расширить спектр их применения, а в некоторых случаях использовать их в качестве независимых средств получения навигационной информации. В связи с этим появились предпосылки к разработке безынерциальных навигационных систем МКА на основе использования спутниковых и астрономических средств измерений. Эти предпосылки позволяют говорить о целесообразности создания адаптивных бортовых информационно-измерительных комплексов (АБИИК) МКА, в которых «навигационное ядро»

формируется исходя из возникающей ситуации, обусловленной различного рода информационными нарушениями [4]. Очевидно, что реализация такого подхода позволяет обеспечить требуемые показатели точности и живучести определения параметров ориентации и навигации в условиях воздействий возмущающих факторов и возникновения нештатных ситуаций.

Концептуальная схема построения АБИИК МКА

Проблема обеспечения требуемых показателей точности и живучести навигационных систем МКА может быть решена с помощью создания адаптивных комплексных навигационных систем [12].

В настоящее время для решения задач навигации и определения ориентации МКА используются следующие типы измерительных приборов и систем:

- инерциальные датчики – акселерометры и гироскопы (инерциальные системы);
- опто-электронные датчики – звёздные датчики, датчики Земли, солнечные датчики;
- аппаратура потребителя спутниковых навигационных систем (СНС), например, типа «ГЛОНАСС/GPS»;
- радиотехнические датчики – датчики определения относительных параметров движения, лазерные дальнометры;
- магнитометры;
- периферийные датчики, измеряющие параметры внешних условий функционирования МКА и его бортовых систем: датчики температуры, датчики накопленной дозы радиационного излучения, датчики давления, датчики вибрации и др.

Обозначим через \mathbf{x} вектор параметров движения МКА, измеряемых датчиками измерительной системы АБИИК, а через Φ – множество возмущающих факторов, влияющих на качество функционирования АБИИК МКА. Тогда

$\tilde{\mathbf{x}} = [\tilde{\mathbf{x}}_и, \tilde{\mathbf{x}}_{оэ}, \tilde{\mathbf{x}}_р, \tilde{\mathbf{x}}_м, \tilde{\mathbf{x}}_с]^T$ – вектор пара-

метров первичной навигационной информации, компонентами которого являются результаты измерений, выполненные соответственно инерциальными, опто-электронными, радиотехническими, магнитными датчиками и навигационной аппаратурой потребителя (НАП).

В общем виде вектор измеренных параметров первичной навигационной информации является функцией от вектора соответствующих истинных параметров \mathbf{x} и множества возмущающих факторов Φ :

$$\tilde{\mathbf{x}} = f_x(\mathbf{x}, \Phi).$$

Задачей первого (нижнего) уровня адаптации является автоматическая подстройка параметров измерительной аппаратуры, изменение которых вызвано влиянием факторов Φ . Решение данной задачи основывается на применении адаптивных и интеллектуальных датчиков, обладающих способностью к идентификации и контролю выходной информации, а также к изменению режимов функционирования с целью обеспечения инвариантности к влиянию возмущающих факторов Φ . Результаты синтеза адаптивных и интеллектуальных датчиков, представленные в работах [13, 14], подтверждают теоретические и практические возможности их использования при решении задач первого уровня адаптации.

Задача второго (среднего) уровня адаптации заключается в нахождении оптимальной оценки текущего вектора параметров навигации и ориентации у МКА на основе множества измеренных $\tilde{\mathbf{x}}$ параметров первичной навигационной информации МКА. Для решения этой задачи в условиях влияния возмущающих факторов на погрешности измерителей используются алгоритмы обработки навигационной информации.

На практике для обработки навигационной информации бортовыми системами КА широкое распространение получили алгоритмы, основанные на применении оптимального фильтра Калмана. Гео-

рия калмановской фильтрации предполагает определённую и стационарность погрешностей и состава измерительных средств систем навигации. Наличие возмущающих факторов и возникновение нештатных ситуаций приводит к расхождению вырабатываемых фильтром оценок.

Одним из способов борьбы с расходимостью оценок является использование адаптивных комплексных методов обработки навигационной информации, учитывающих изменение условий функционирования АБИИК МКА вследствие воздействия возмущающих факторов и возникновения нештатных ситуаций.

Задача второго уровня адаптации относится к классу информационной адаптации.

Техническая реализация информационной адаптации АБИИК МКА осуществляется двумя способами. Первый способ заключается в выборе по заданному критерию алгоритма определения ориентации и навигации из перечня алгоритмов, находящихся в бортовом вычислителе.

Один из вариантов построения такой многоструктурной навигационной системы рассмотрен в работе [15]. Анализ первого способа информационной адаптации показывает, что при его реализации ужесточаются требования к памяти бортового вычислителя АБИИК МКА, где хранится множество альтернативных алгоритмов определения параметров движения МКА, количество которых определяется множеством возможных нештатных ситуаций S .

Второй способ заключается в применении алгоритмов комплексной обработки навигационной информации, модифицируемых в зависимости от возникшей проблемной ситуации. Этот способ реализуется на основе применения адаптивных фильтров, построенных, например, с помощью модифицированного фильтра Калмана или аппарата нейросетевых алгоритмов ориентации и навигации [4-7]. Реализация второго способа позволяет снизить требования к памяти и быстродействию

используемого бортового вычислителя на 20-30% [10].

Одним из принципов создания адаптивных и самоорганизующихся навигационных комплексов является применение средств контроля и диагностики информационных нарушений [4] измерительной аппаратуры. В составе АБИИК МКА используется блок идентификации навигационной информации, поступающей с выхода датчиков измерительной системы.

Измерительная система характеризуется определённой совокупностью видов технического состояния. Идентификация вида технического состояния измерительной системы осуществляется в соответствии с множеством продукционных правил Π . С помощью этих правил определяется тип нештатной ситуации S_q :

$$S_q = S_q(\tilde{x}, \Pi).$$

Нештатные ситуации могут быть предусмотренные ($q = \alpha$) и непредусмотренные ($q = \beta$). Непредусмотренные нештатные ситуации возникают, например, вследствие сбоя в блоке идентификации при количестве отказавших измерительных датчиков и систем, превышающих предельное значение, либо вследствие отсутствия такого решения в базе знаний. При возникновении нештатной ситуации S_α формируется управление

$$U_\Pi = U_\Pi(S_\alpha, A_S),$$

где A_S – множество альтернативных решений, позволяющих обеспечить целостность навигационной информации при нештатной ситуации.

В случае возникновения непредусмотренной нештатной ситуации S_β управление априорно неизвестно.

Концептуальная схема построения АБИИК МКА изображена на рис. 1.

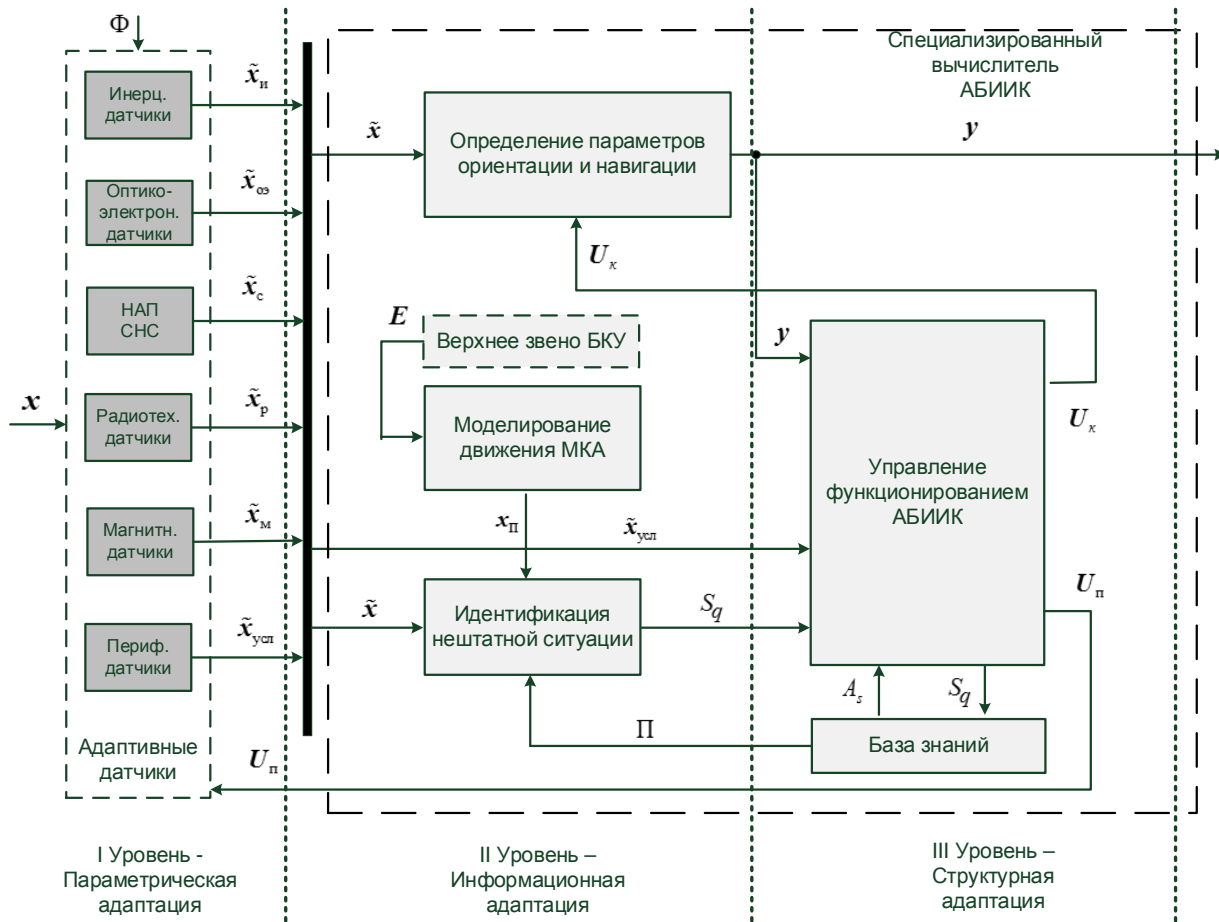


Рис. 1. Концептуальная схема построения АБИИК КА

Внедрение рассмотренных способов реализации информационной адаптации АБИИК МКА предполагает создание множества управлений режимами функционирования элементов АБИИК $U = \{U_n, U_k\}$, а также использование множества моделей движения МКА, позволяющих оценивать прогнозные значения $x_{п}$ параметров ориентации и навигации на основании априорно известных значений моментов и сил, действующих на МКА. Для использования множества моделей от бортового комплекса управления поступают сообщения $E = \{e_1, \dots, e_z\}$. Эти сообщения содержат в себе информацию о текущих массово-габаритных характеристиках и режимах функционирования МКА, команды на включение и выключение двигательных установок. Фор-

мирование вектора управления U_k , обеспечивающего выбор алгоритма определения параметров движения, осуществляется на основе имеющейся информации о текущих \tilde{x} и прогнозных $x_{п}$ значениях параметров движения МКА, а также информации о нештатной ситуации S . Формирование множества управлений $U = \{U_n, U_k\}$ в зависимости от вида нештатной ситуации S осуществляется в рамках третьего уровня адаптации – уровня самоорганизации.

Обеспечение оптимальных характеристик точности адаптивных и интеллектуальных датчиков осуществляется вариацией режимов их функционирования, заключающихся, главным образом, в выборе диапазонов измерения, а также применении автономных методов калибровки. Для этих целей формируется соответ-

ствующее управление режимами работы датчиков измерительной системы U_k . Результаты проведения автономной калибровки отдельных датчиков в виде множества метрологических характеристик передаются в блок определения параметров ориентации и навигации МКА. Реализация множества управлений $U = \{U_n, U_k\}$ относится к классу задач самоорганизации (структурная адаптация), заключающихся в выборе оптимального состава информации от измерителей и программно-алгоритмического обеспечения, необходимого для определения параметров навигации и ориентации с требуемыми показателями точности и живучести.

Следует отметить, что некоторые из задач идентификации и вариации режимов функционирования могут входить в перечень функционала адаптивных и интеллектуальных датчиков, то есть выполняться автономно без управления U_k .

С целью сравнительного анализа точности традиционных и адаптивных навигационных систем проведено математическое моделирование их функционирования в условиях влияния возмущающих факторов и возникновения нештатных ситуаций. При этом полагалось, что моменты времени t_0 и t_k соответствуют началу и концу навигационного режима. Для удовлетворения требований к точности навигации ($\sigma_x \leq \sigma_{x,тр}$, где $\sigma_{x,тр}$ – требуемое значение суммарной погрешности навигации) в моменты времени $t_{кор}$ необходимо проводить коррекцию погрешностей навигационной системы от внешних источников информации.

На рис. 2 показаны графики зависимости суммарной погрешности навигации σ_x от времени функционирования навигационных систем. При этом рассмотрены два варианта решения навигационной задачи: в варианте А используется традиционная навигационная система, а в варианте Б – АБИИК.

Анализ проведённых исследований показывает, что применение АБИИК поз-

волит, во-первых, снизить рост погрешности навигации, обусловленный влиянием возмущающих факторов и последствиями нештатных ситуаций, и, во-вторых, сократить частоту внешних коррекций навигационной системы, проведение которых снижает уровень живучести её функционирования.

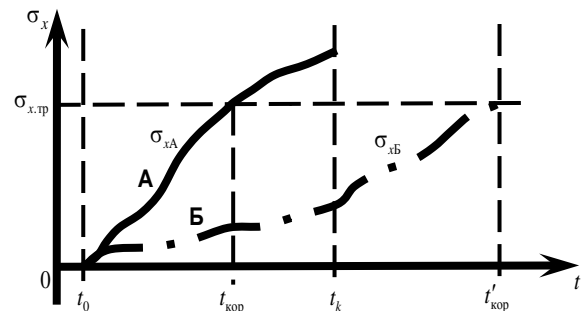


Рис. 2. Графики функций погрешностей навигации от времени при использовании традиционных навигационных систем (А) и АБИИК (Б)

Заключение

Таким образом, для обеспечения требуемых показателей точности и живучести навигационных систем МКА в условиях априорно-неопределённых возмущающих факторов и возникновения нештатных ситуаций представляется актуальным применение адаптивного бортового информационно-измерительного комплекса. В статье обоснована многоуровневая архитектура построения такого комплекса на различных этапах его функционирования. Она отличается от известных архитектур использованием параметрической настройки датчиков измерительной системы, адаптивных алгоритмов навигации – информационной адаптацией, а также самоорганизацией функционирования комплекса. Внедрение этой концепции позволит повысить показатели точности и живучести МКА в условиях воздействия возмущающих факторов и возникновения нештатных ситуаций. Для реализации разработанной концепции могут применяться технологии искусственного интеллекта в рамках решения задач структурного, параметрического и информационного синтеза АБИИК МКА.

Библиографический список

1. Бурдаков В.П., Зигель Ф.Ю. Физические основы космонавтики. Физика космоса. М.: Атомиздат, 1975. 232 с.
2. Голяков А.Д., Фоминов И.В. Анализ влияния надёжности и стойкости адаптивных информационно-измерительных навигационных систем на эффективность их использования // Навигация и гидрография. 2013. № 36. С. 9-16.
3. Тимофеев А.В. и др. Методы оптимального, робастного и адаптивного управления роботами, машинами и аэрокосмическими аппаратами // Информационный бюллетень РФФИ. 1994. Т. 2, № 1. С. 193.
4. Дмитриев С.П., Колесов Н.В., Осипов А.В. Информационная надёжность, контроль и диагностика навигационных систем. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 207 с.
5. Ефимов В.В., Пасталака В.В. Повышение автономности интегрированной навигационной системы космического аппарата на основе нейросетевого подхода // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 51-56.
6. Тихонов В.А. Использование нейросетей в алгоритмах работы и комплексирования систем навигационного комплекса // Сб. трудов международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». М.: МАИ, 1998. С. 284-287.
7. Тихонов В.А., Нагаев С.В. Аппроксимация нейронными сетями алгоритмов навигационной системы // Сб. трудов международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». М.: МАИ, 1999. С. 256-258.
8. Тихонов В.А. Исследование нейросетевых моделей алгоритмов БИНС // Авиакосмическое приборостроение. 2006. № 1. С. 39-45.
9. Помыкаев И.И., Селезнёв В.П., Дмитроченко Л.А. Навигационные приборы и системы: уч. пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1983. 455 с.
10. Алёшин Б.С. и др. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / под ред. Б.С. Алёшина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 424 с.
11. Пупков К.А. Неусыпин К.А., Кэ Фан Интеллектуализация измерительного комплекса летательного аппарата // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 8. С. 18-23.
12. Фоминов И.В. Обобщённая структура адаптивного информационно-измерительного комплекса подвижного объекта // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 5-9.
13. Фоминов И.В., Малетин А.Н. Алгоритм самонастройки маятникового автоколебательного акселерометра при воздействии периодических возмущений // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 9. С. 28-33.
14. Калихман Д.М. и др. Принципы разработки цифровых помехоустойчивых регуляторов измерения угловой скорости и кажущегося ускорения в современных БИНС и программно-математического обеспечения для их контроля // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2013. С. 285-291.
15. Соколов С.В., Погорелов В.А. Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных навигационных систем / под ред. В.А. Погорелова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 184 с.

Информация об авторе

Фоминов Иван Вячеславович, кандидат технических наук, докторант кафедры автономных систем управления, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можай-

ского, г. Санкт-Петербург. E-mail: i.v.fominov@gmail.com. Область научных интересов: системы навигации и управления движением космических аппаратов.

CONCEPT OF MULTILEVEL ADAPTATION OF INTEGRATED NAVIGATION SYSTEMS OF SMALL SPACECRAFT

© 2015 I. V. Fominov

Military Space Academy named after A.F. Mozhaiskiy,
St. Petersburg, Russian Federation

The concept of constructing an adaptive on-board information and measuring complex of small spacecraft is discussed in the paper. The developed concept of multilevel adaptation of integrated navigation systems of small spacecraft provides the required accuracy and survivability in conditions of influencing factors and emergency situations. Lack of clearly defined information-measuring core inherent in modern integrated navigation systems of different moving objects is a distinctive feature of the proposed concept. Basic information of a navigation system with respect to which correction of other systems is supposed to be carried out is formed in accordance with the situation determined by the level of disturbances and failures taking place, as well as modes of operation of small spacecraft. The concept involves three levels: parametric, information and structural adaptation. The parametric level assumes automatic tuning of the parameters of measuring system sensors to ensure the best mode of operation in terms of accuracy. The information level of adaptation provides the required accuracy of determining the parameters of orientation and navigation through the implementation of an adaptive method of complex processing of navigational information. The structural layer provides the system's self-organization that consists in providing the control of modes of operation of measuring equipment and information resources to ensure the integrity of navigation information in a contingency situation. Methods of system analysis were used in developing the concept of multi-level adaptation of an adaptive on-board information and measuring complex of small spacecraft.

Navigation system, adaptation, identification, adaptive on-board information and measuring complex, small spacecraft.

References

1. Burdakov V.P., Zigel F.Yu. *Fizicheskie osnovy kosmonavтики. Fizika kosmosa* [Physical basis of astronautics. Space physics]. Moscow: Atomizdat Publ., 1975. 232 p.
2. Golyakov A.D., Fominov I.V. Analysis of influence of reliability and stability of adaptive information measuring-navigation systems on effectiveness of their employment. *Navigation and hydrography*. 2013. No. 36. P. 9-16.
3. Timofeev A.V. et al. Methods of optimal, robust and adaptive control of robots, machinery and aerospace vehicles. *Informatsionnyy byulleten' RFFI*. 1994. T. 2, no. 1. P. 193.
4. Dmitriev S.P., Kolesov N.V., Osipov A.V. *Informatsionnaya nadezhnost', kontrol' i diagnostika navigatsionnykh sistem* [Information reliability, control and diagnostics of navigation systems]. SPb.: TsNII "Electropribor" Publ., 2003. 207 p.
5. Efimov V.V., Pastalaka V.V. Increase of autonomy of the integrated navigating system of a space vehicle on a basis of the neural network approach. *Izvestia vuzov. Priborostroenie*. 2005. V. 48, no. 6. P. 51-56. (In Russ.)
6. Tikhonov V.A. Using neural network algorithms work and integraton systems navigation system. *Proc. tr. International STC «Modern-technologies in control, automation and information processing»*. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 1998. P. 284-287.
7. Tikhonov V.A., Nagaev S.V. Approximation of neural networks algorithms naviga-

tion system. *Proc. tr. International STC "Modern technologies in control, automation and information processing."* Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 1999. P. 256-258.

8. Tikhonov V.A. Investigation of neural network models of strapdown inertial navigation system algorithms. *Aerospace Instrument-Making*. 2006. No. 1. P. 39-45. (In Russ.)

9. Pomykaev I.I. et al. *Navigatsionnye pribory i sistemy: uch. posobie dlya vuzov* [Navigation devices and systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 455 p.

10. Aleshin B.S. et al. *Orientatsiya i navigatsiya podvizhnykh ob"ektov: sovremennye informatsionnye tekhnologii* [Orientation and navigation of mobile objects: modern information technologies / edited by B.S. Aleshin, K.K. Veremeyenko, A.I. Chernomorsky]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2006. 424 p.

11. Pupkov K.A., Neusypin K.A., Ke Fan Intellectualization of a measuring complex of the aircraft. *Izvestia vuzov. Priborostroenie*. 2004. V. 47, no 8. P. 18-23. (In Russ.)

12. Fominov I.V. Generalized structure of the adaptive information and measuring com-

plex of mobile object. *Izvestia vuzov. Priborostroenie*. 2013. V. 56, no.7. P. 5-9. (In Russ.)

13. Fominov I.V., Maletin A.N. Algorithm of self-adjustment of pendulous auto-oscillating accelerometer under the influence of high-frequency periodic disturbances. *Izvestiavuzov. Priborostroenie*. 2011. V. 54, no. 9. P. 28-33. (In Russ.)

14. Kalikhman D.M. et al. Principles of error-correcting digital controller and the measurement of the angular velocity and the apparent acceleration in modern SINS and mathematical software to control them. *XX St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation system*. SPb.: TsNII "Elektropribor" Publ., 2013. P. 285-291. (In Russ.)

15. Sokolov S.V., Pogorelov V.A. *Osnovy sinteza mnogostrukturnykh besplatformennykh navigatsionnykh sistem / pod red. V.A. Pogorelova* [Fundamentals of synthesis of multistructural platformless navigation systems / edited by V.A. Pogorelov]. M.: FIZMATLIT Publ., 2009. 184 p.

About the author

Fominov Ivan Vyacheslavovich, Candidate of Science (Engineering), doctoral student, Department of Autonomous Control Systems, Military Space Academy named after A.F.

Mozhaisky, St. Petersburg, Russian Federation. E-mail: i.v.fominov@gmail.com. Area of Research: navigation and control of spacecraft motion.